ChinaXiv合作期刊

DOI：10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20230512.003

伽马噪窄线赛弗特 1 型星系 TXS 1206+549 的中红外波段光变性质研究

黄伟天，宁宫明，毛李胜*

（云南师范大学物理与电子信息学院，云南 昆明　650500）

摘要：TXS 1206+549(红移 $z=1.344$)是目前发现的最遥远的伽马噪窄线赛弗特 1 型星系。利用广域红外巡天探测器(Wide-field Infrared Survey Explorer，WISE)的长期测光数据，从两个方面系统研究了 TXS 1206+549 中红外波段的光变性质。首先，联合 3 种统计方法，研究了 TXS 1206+549 的日内光变(Intraday Variability，IDV)，发现 TXS 1206+549 在 2022 年 4 月 29 日达到迄今为止所有 WISE 观测窗口的最亮水平，表现出非常特殊的光变过程：在约 1.24 天内，3.4 μm 和 4.6 μm 波段分别持续变暗约 1.1 mag 和 1.0 mag。据调研，这是第 1 次报道关于 TXS 1206+549 高置信度的中红外波段日内光变。TXS 1206+549 在 3.4 μm 和 4.6 μm 波段的占空系数(Duty Cycle，DC)分别为 27.8%和 13.7%，明显低于 Rakshit 等人的结果，这是由于我们采用了相对保守的日内光变标准(大于 3σ)。基于所有 WISE 观测窗口的测光数据(共 21 个窗口)，研究了均方根–流量(rms-flux)关系，发现两者之间存在显著的线性关系。另外，发现 TXS 1206+549 在长时标上未表现出显著的颜色变化(即消色差)，但在天量级时标上普遍表现出变亮变蓝(Bluer-When-Brighter，BWB)的趋势。结果暗示不同时标上 TXS 1206+549 的中红外波段光变机制不同：长期光变可能与多普勒效应相关，日内光变则可能与喷流中的激波有关。

关键词：赛弗特星系；红外光变；颜色变化；激波

中图分类号：P157　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-7673(2023)05-0383-13

活动星系核(Active Galactic Nuclei，AGN)是宇宙中最高能、最致密的天体之一，它们的辐射能量来源于中央超大质量黑洞的气体/尘埃吸积过程。赛弗特星系(Seyfert Galaxy)是一种活动星系核，可以分为两个标准次型：赛弗特 1 型和 2 型星系。前者的光谱中存在宽的允许线，后者的允许线宽度和禁线宽度相差不大。在活动星系核统一模型中，两者的中心引擎结构类似，观测性质的差异来源于不同的观测视角[1]。另外，赛弗特星系还包含一个性质尤为独特的子类——窄线赛弗特 1 型星系(Narrow Line Seyfert 1 Galaxies，NLS1s)。它们的光谱具有相对窄的 Hβ 发射线线宽(半峰全宽小于 2 000 km · s^{-1})和较弱的禁线([OIII]λ5007/Hβ < 3)，强铁发射线，陡峭的 X 射线谱和快速大幅 X 射线光变[2-3]。绝大部分窄线赛弗特 1 型星系表现为射电宁静，仅有约 7%表现为射电噪，这些源中显著的射电辐射一般认为来自相对论性喷流[4]。相对于类似光度的宽发射线赛弗特 1 型星系，它们具有较低的黑洞质量和较高的吸积率(接近爱丁顿极限)[5]。

费米空间望远镜(Fermi-LAT)的长时、高精度、全域巡天探测到 20 多个窄线赛弗特 1 型星系的伽马射线辐射(下文简称为 GNLS1s)，表明部分赛弗特星系中存在相对论性喷流结构[6-7]。它们是除耀变体(Blazar)和射电星系(Radio Galaxy)外，被发现的第 3 种具有伽马射线辐射的活动星系核。有观测

基金项目：国家自然科学基金（12063007）；云南省“兴滇英才支持计划”资助.

收稿日期：2023-05-03；修订日期：2023-05-08

作者简介：黄伟天，男，硕士研究生，主要研究活动星系核. Email：huangweitian21@163.com.

* 通信作者：毛李胜，男，副教授，主要研究活动星系核. Email：maolisheng@ynnu.edu.cn.

ChinaXiv:202311.00004v1

ChinaXiv合作期刊

表明，赛弗特星系的寄主星系一般为低质量旋涡星系，在这类星系中发现相对论性喷流可能挑战现有的喷流产生机制。因为主流观点认为，相对论性喷流一般起源于星系合并形成的大质量椭圆星系(例如在耀变体、射电星系中)[8-9]。相对于众多的、具有伽马射线辐射、寄主星系为椭圆星系的耀变体，GNLS1s 数量稀少。观测表明，这两类源的寄主星系不同，却具有较多类似的物理性质，例如单向探测喷流、射电平谱、双峰能谱结构、高偏振、快速日内光变、喷流成分的视超光速运动等性质[6,8]。

光变分析是探索活动星系核内部物理过程的一种重要手段。在前期工作中，我们收集整理了 25 个已知的 GNLS1s 或高置信度候选体[9]。我们利用广域红外巡天探测器的测光数据，系统搜寻了这些源的中红外波段日内光变，发现其中 13 个源至少在一个观测窗口表现出显著(大于 3σ)的日内光变。这 25 个 GNLS1s 红移均小于 1。最近，文[10]报道了一个新的伽马噪窄线赛弗特 1 型星系 TXS 1206+549(赤经 RA=12h08m54.2564s，赤纬 Dec=+54d41m58.162s)，光谱红移 z=1.344，这是迄今为止发现的红移最大的 GNLS1 星系。这个源具有平的射电谱，大于 100 的射电噪度(即表现为射电甚噪)，典型的双峰能谱结构，存在多波段光变。他们利用文[11]的 σ_m 参数(误差修正的内禀光变幅度)粗略研究了这个源的中红外波段日内光变，在共 14 组天量级光变曲线中，计算了 TXS 1206+549 的 3.4 μm 和 4.6 μm 波段光变幅度 σ_m，采用 $\sigma_m>0$ 的标准，计算了 3.4 μm 和 4.6 μm 波段的日内光变占空系数，结果分别为 91% 和 79%，表明这个源在天量级时标上活动性极强。

本文聚焦研究 TXS 1206+549 的中红外波段日内光变，主要考虑如下几点：

(1) WISE 最近释放了新的观测数据，测光数据延伸到 2022 年 12 月 13 日，本文将最新的 WISE 观测数据加入日内光变分析中。文[10]是基于 14 组天量级光变曲线展开研究，本文则包括 21 组天量级光变曲线。特别地，我们注意到 TXS 1206+549 在 $MJD\approx59698$(2022 年 4 月 29 日)处于所有 WISE 观测窗口中的最亮阶段，3.4 μm 和 4.6 μm 波段星等分别达到 12.7 mag 和 11.6 mag。在这个观测窗口，TXS 1206+549 表现出显著的日内光变，这是首次报道 TXS 1206+549 中确认的中红外波段日内光变现象。

(2) 由于红移大、距离远，在大部分 WISE 观测窗口，TXS 1206+549 处于较“暗”水平。对于这种“暗”源，观测星等的误差较大。因此，类似于前期工作[9]，我们采用 3 种统计方法相结合的方式仔细搜寻 TXS 1206+549 每条天量级光变曲线中大于 3σ 的日内光变。相对于文[10]仅基于光变幅度 $\sigma_m>0$ 的标准，我们选择的光变标准更严格，可信度更高。

(3) 作为前期工作的补充[3,9]，本文还系统研究了 TXS 1206+549 的短时标和长时标颜色变化，探讨了不同时标上光变机制的差异。

1 WISE 光变曲线

广域红外巡天探测器是美国航空航天局在 2009 年 12 月发射的空间望远镜，任务为在红外波段绘制整个天空的图像[12]。WISE 搭载了一台 40 cm 口径的红外望远镜，工作在 3.4 μm，4.6 μm，12 μm 和 22 μm 波段(分别称为 W_1，W_2，W_3 和 W_4 波段)，空间分辨率为 6.1″，6.4″，6.5″和 12″。WISE 每 6 个月完成一次全天区巡天任务。在大约 1 天时间内，探测器绕其轨道运行 15 次，因而可以得到目标源包含多个测光数据点(典型值 12 个)的天量级光变曲线[13]。相比红外天文卫星(Infrared Astronomical Satellite，IRAS)，WISE 的灵敏度提高了 100 倍左右，给天文学家提供了前所未有的机遇来研究活动星系核的红外性质[14]。

利用美国航空航天局红外科学数据库(NASA/IPAC Infrared Science Archive)和 3″搜索半径，我们获取了 TXS 1206+549(它的 WISE 对应体的名称为 WISE J120854.25+544158.2)在 2010 年 5 月至 2022 年 12 月的 W_1 和 W_2 波段所有原始测光数据。首先，我们对数据进行了必要的筛选，剔除不良数据，采用的标准为 $nb=1$，$na=0$，moon_masked=‘00’，cc_flags=‘00’，$w_1$sat=0，$w_2$sat=0，$w_1$snr≥7，$w_2$snr≥5，$w_1$rchi$_2$<10，$w_2$rchi$_2$<10，qual_frame>0，qi_fact>0，saa_sep>0，sso_flag=0。另外，还剔除了 W_1 或 W_2 星等仅为上限的数据点。测光数据质量的详情可参考官方文档。最后得到了 TXS 1206+549 的 W_1

ChinaXiv:202311.00004v1

ChinaXiv合作期刊

ChinaXiv:202311.00004v1

和 W_2 波段同时性光变曲线，共 21 个观测窗口(Epoch)，309 组 W_1 和 W_2 测光数据(见图 1 和表 1 展示的部分数据)。每个观测窗口平均包含 15 组测光数据，平均观测时长约 1.28 天(见表 2 的第 2、第 3 列)。

表 1 给出了详细的 W_1 和 W_2 波段测光数据。第 1 列为观测窗口序号；第 2 列为简化儒略日期 MJD；第 3 列为 W_1 星等；第 4 列为 W_1 星等误差；第 5 列为 W_1 波段的仪器轮廓拟合测光信噪比 SNR_1；第 6 列为 W_1 波段的仪器轮廓拟合测光简化卡方值；第 7 至第 10 列类似第 3 至第 6 列，描述的是 W_2 波段。表 2 给出了每个观测窗口的时长(第 2 列，单位为天)、测光点个数(第 3 列)、平均 W_1 星等(第 4 列)、平均 W_2 星等(第 5 列)和平均色指数 W_1-W_2(第 6 列)。

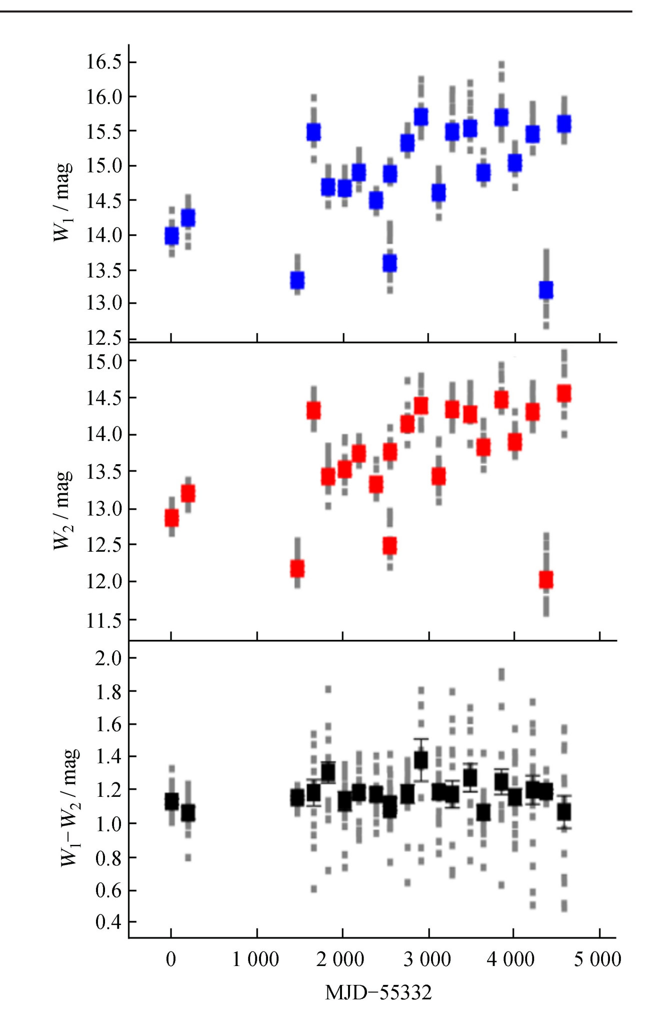


图 1　W_1 和 W_2 波段光变曲线以及颜色 W_1-W_2 的长期变化。灰色小方形表示每个观测窗口的数据；蓝色、红色、黑色大方形分别表示每个观测窗口的平均 W_1 星等、平均 W_2 星等、平均颜色 W_1-W_2

Fig. 1　The light curves on W_1 and W_2 bands, and the long-term variability of color index W_1-W_2. The grey small squares represent the data of every observational epoch; the blue, red and black big squares are the average W_1 magnitudes, W_2 magnitudes, and color indices W_1-W_2 during individual observational epoch, respectively

2　日内光变分析

对于每条天量级 W_1 和 W_2 波段光变曲线，联合 3 种统计方法判断是否表现出日内光变。

2.1　参数 V

文[15]定义了衡量光变概率的参数 V，广泛用于各种光变研究中。参数 V 由光变曲线的卡方值导出：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_{\rm ob}} \frac{(m_i - \overline{m})^2}{\sigma_{{\rm err},i}^2} , \qquad (1)$$

其中，m_i 为星等；$\sigma_{{\rm err},i}$ 为星等误差；$\overline{m}$ 为平均星等；$N_{\rm ob}$ 为数据点个数。

$$V = -\log\left[1 - \Gamma\left(\frac{N_{\rm ob}-1}{2}, \frac{\chi^2}{2}\right)\right], \qquad (2)$$

其中，Γ 为不完全伽马函数。V 值越大，光变的概率越高。文献中常采用的标准为 $V>1.3$，即光变概率高于 95%。所有参数 V 的计算结果展示在表 3 的第 2 和第 3 列中。

2.2　标准额外方差 $\sigma_{\rm NXV}^2$

标准额外方差 $\sigma_{\rm NXV}^2$ 常用来衡量光变幅度，“额外”表示从总方差中去除观测误差带来的方差[16]。具体定义为

$$\sigma_{\rm NXV}^2 = \frac{1}{N_{\rm ob}\overline{y}^2} \sum_{i=1}^{N_{\rm ob}} [(y_i - \overline{y})^2 - \sigma_{{\rm err},i}^2] , \qquad (3)$$

$\sigma_{\rm NXV}^2$ 的误差为

$$err(\sigma_{\rm NXV}^2) = \frac{S_{\rm D}}{\overline{y}^2 N_{\rm ob}^{1/2}} , \qquad (4)$$

$$S_{\rm D}^2 = \frac{1}{N_{\rm ob}} \sum_{i=1}^{N_{\rm ob}} \{[(y_i - \overline{y})^2 - \sigma_{{\rm err},i}^2] - \sigma_{\rm NXV}^2 \overline{y}^2\}^2, \qquad (5)$$

ChinaXiv合作期刊

表 1 测光数据

Table 1 Photometric data

Epoch (1)	MJD (2)	W_1/mag (3)	e_W_1/mag (4)	SNR_1 (5)	w_1rchi_2 (6)	W_2/mag (7)	e_W_2/mag (8)	SNR_2 (9)	w_2rchi_2 (10)
1	55332. 741073	14. 094	0. 057	19. 1	1. 04E+00	12. 904	0. 059	18. 4	1. 45E+00
	55332. 873377	14. 364	0. 062	17. 6	1. 49E+00	13. 111	0. 060	18. 1	1. 27E+00
	55333. 005681	14. 049	0. 063	17. 3	4. 55E-01	12. 894	0. 058	18. 7	1. 25E+00
	55333. 137858	13. 913	0. 049	22. 1	1. 28E+00	12. 788	0. 049	22. 0	6. 88E-01
	55333. 137985	13. 998	0. 051	21. 4	1. 86E+00	12. 891	0. 058	18. 7	2. 51E+00
	55333. 204073	14. 071	0. 050	21. 9	1. 14E+00	12. 925	0. 056	19. 5	1. 19E+00
	55333. 270162	14. 122	0. 057	19. 0	1. 07E+00	12. 924	0. 054	20. 3	1. 15E+00
	55333. 270289	13. 965	0. 051	21. 4	1. 33E+00	12. 936	0. 058	18. 8	1. 59E+00
	55333. 336377	14. 107	0. 051	21. 2	1. 45E+00	12. 961	0. 062	17. 5	6. 86E-01
	55333. 402593	14. 068	0. 058	18. 7	9. 60E-01	13. 034	0. 062	17. 4	8. 65E-01
	55333. 468681	14. 180	0. 061	17. 9	9. 43E-01	12. 851	0. 054	20. 1	1. 44E+00
	55333. 534770	13. 940	0. 054	20. 2	1. 30E+00	12. 842	0. 051	21. 2	1. 43E+00
	55333. 534897	14. 078	0. 058	18. 7	2. 49E+00	12. 955	0. 058	18. 7	1. 61E+00
	55333. 600985	13. 994	0. 047	22. 9	1. 89E+00	12. 807	0. 056	19. 5	1. 40E+00
	55333. 667074	13. 875	0. 051	21. 3	6. 87E-01	12. 785	0. 051	21. 4	9. 10E-01
	55333. 667201	13. 988	0. 054	20. 1	1. 42E+00	12. 915	0. 054	20. 2	1. 00E+00
	55333. 733289	13. 746	0. 042	25. 9	1. 13E+00	12. 691	0. 053	20. 7	1. 16E+00
	55333. 865593	13. 976	0. 052	20. 9	1. 26E+00	12. 734	0. 056	19. 4	4. 09E-01
	55333. 997897	14. 071	0. 052	21. 0	1. 35E+00	13. 065	0. 065	16. 7	9. 94E-01
	55334. 130201	13. 737	0. 042	25. 7	1. 64E+00	12. 663	0. 049	22. 3	6. 84E-01

注：表 1 只列出了首个观测窗口的测光数据，完整表 1 存储在国家天文科学数据中心(NADC)，可点击 http://paperdata.china-vo.org/MLS/TXS1206.csv 直接下载。

误差较大时，$err(\sigma^2_{\rm NXV})$可能大于$\sigma^2_{\rm NXV}$。参考文[16]，定义$\Delta=\sigma^2_{\rm NXV}-err(\sigma^2_{\rm NXV})$。如果$\Delta>0$，表明误差修正的内禀光变幅度大于0。所有参数$\Delta$的计算结果展示在表 3 的第 4 和第 5 列中。

2.3 光变显著性

在[X]波段(X=3.4，4.6 分别表示 W_1波段，W_2波段)的第 i 条天量级光变曲线，按

$$\Phi[X]^i=\sqrt{\frac{1}{N_{\rm ob}-1}\sum_{j=1}^{N_{\rm ob}}\left(m[X]^i_j-\overline{m[X]^i}\right)^2} \tag{6}$$

计算标准偏差，其中，$\overline{m[X]^i}$是第 i 条天量级光变曲线在 Xμm 波段的平均星等。

WISE 的巡天视场为 47′×47′。我们利用一个更大的搜索范围 60′×60′，获取 TXS 1206+549 附近所有的源，限定与第 i 条天量级光变曲线有类似的观测时段(即 MJD 范围)和测光点个数后，计算所有剩余源的平均[X]波段星等，最后挑出 200 个最接近 TXS 1206+549 在此时的平均[X]波段星等的源。对于挑出的 200 个源的同时段光变曲线，按照(6)式同样计算光变标准偏差。它们的平均值记作$\Phi'[X]^i$，标准偏差记作$\varepsilon'[X]$。类似文[17]，按

$$\sigma[X]=\frac{\Phi[X]^i-\Phi'[X]^i}{\varepsilon'[X]} \tag{7}$$

估算第 i 条[X]波段天量级光变曲线的光变置信度，$\sigma[X]>3$ 表示置信度达到3σ 的日内光变。表 4 展示了光变置信度估计的结果。

ChinaXiv:202311.00004v1

ChinaXiv合作期刊

表 2　每个观测窗口的平均星等与颜色

Table 2　Average W_1 and W_2 magnitudes and average color for each epoch

Epoch (1)	ΔT (2)	N (3)	W_1/mag (4)	W_2/mag (5)	W_1-W_2/mag (6)
1	1.39	20	13.991±0.033	12.870±0.026	1.130±0.018
2	1.26	14	14.251±0.061	13.203±0.036	1.062±0.037
3	1.38	16	13.352±0.043	12.181±0.043	1.154±0.012
4	1.12	12	15.488±0.072	14.330±0.058	1.184±0.079
5	1.38	16	14.697±0.045	13.432±0.056	1.306±0.063
6	1.11	11	14.677±0.041	13.531±0.070	1.132±0.058
7	1.38	18	14.905±0.031	13.745±0.025	1.185±0.033
8	1.24	13	14.504±0.029	13.328±0.039	1.174±0.036
9	1.24	16	13.598±0.066	12.494±0.048	1.083±0.021
10	1.24	15	14.885±0.023	13.767±0.029	1.115±0.036
11	1.11	11	15.331±0.033	14.148±0.053	1.177±0.056
12	1.37	9	15.707±0.081	14.395±0.090	1.381±0.127
13	1.24	17	14.616±0.054	13.437±0.049	1.188±0.042
14	1.37	14	15.492±0.071	14.345±0.058	1.175±0.082
15	1.24	11	15.540±0.072	14.278±0.102	1.274±0.084
16	1.24	15	14.903±0.025	13.832±0.048	1.065±0.044
17	1.37	14	15.699±0.069	14.478±0.042	1.250±0.076
18	1.37	18	15.045±0.040	13.902±0.038	1.158±0.050
19	1.24	15	15.457±0.066	14.310±0.049	1.201±0.087
20	1.37	18	13.210±0.078	12.033±0.072	1.191±0.013
21	1.24	16	15.608±0.044	14.563±0.070	1.068±0.098

表 3　所有观测窗口的参数 V 和参数 Δ

Table 3　The parameters of V and Δ for all epochs

Epoch (1)	V[3.4] (2)	V[4.6] (3)	Δ[3.4] (4)	Δ[4.6] (5)
1	21.4	9.3	>0	>0
2	30.7	4.6	>0	>0
3	>100	>100	>0	>0
4	2.5	0.3	>0	<0
5	8.7	8.5	>0	>0
6	3.2	5.1	>0	>0
7	2.0	0.1	>0	<0
8	2.0	2.2	>0	>0
9	>100	36.2	>0	>0
10	0.2	0.2	<0	<0
11	0.2	0.3	<0	<0
12	1.2	0.6	>0	<0
13	19.1	7.5	>0	>0
14	3.6	0.4	>0	<0
15	1.9	1.9	>0	>0
16	0.4	1.7	<0	>0
17	1.8	0	>0	<0
18	3.1	0.5	>0	<0
19	3.7	0.2	>0	<0
20	>100	>100	>0	>0
21	0.4	0.5	<0	<0

表 4　光变置信度

Table 4　Significance level of variability

Epoch (1)	Φ [3.4]^i (2)	Φ'[3.4]± ε'[3.4] (3)	σ [3.4] (4)	Φ [4.6] (5)	Φ'[4.6]± ε'[4.6] (6)	σ [4.6] (7)
1	0.14	0.07±0.02	>3	0.12	0.08±0.02	<3
2	0.21	0.08±0.02	>3	0.13	0.11±0.03	<3
3	0.18	0.05±0.01	>3	0.18	0.05±0.02	>3
4	0.27	0.22±0.07	<3	0.21	0.25±0.07	<3
5	0.18	0.12±0.04	<3	0.23	0.13±0.04	<3
6	0.15	0.11±0.04	<3	0.26	0.15±0.06	<3
7	0.14	0.13±0.03	<3	0.12	0.17±0.05	<3
8	0.10	0.10±0.03	<3	0.15	0.12±0.04	<3
9	0.31	0.06±0.02	>3	0.25	0.08±0.03	>3
10	0.10	0.13±0.03	<3	0.13	0.18±0.06	<3
11	0.13	0.19±0.06	<3	0.23	0.23±0.08	<3
12	0.30	0.33±0.11	<3	0.28	0.38±0.10	<3
13	0.23	0.11±0.03	>3	0.22	0.14±0.05	<3
14	0.33	0.25±0.05	<3	0.22	0.28±0.08	<3
15	0.33	0.28±0.11	<3	0.33	0.28±0.09	<3
16	0.12	0.14±0.03	<3	0.19	0.18±0.06	<3
17	0.35	0.26±0.07	<3	0.20	0.30±0.07	<3
18	0.16	0.15±0.04	<3	0.18	0.19±0.05	<3
19	0.27	0.21±0.06	<3	0.21	0.26±0.07	<3
20	0.33	0.04±0.01	>3	0.32	0.05±0.02	>3
21	0.19	0.24±0.06	<3	0.34	0.30±0.07	<3

ChinaXiv:202311.00004v1

ChinaXiv合作期刊

与前期工作相同，我们联合上述 3 个统计量判定是否表现出日内光变：$V[X]>1.3$ & $\Delta[X]>0$ & $\sigma[X]>3$，即同时满足上述关系时，认为在$[X]$波段表现出大于 3σ 的显著日内光变。在 TXS 1206+549 的 21 个 WISE 观测窗口中，有 3 个窗口 W_1波段和 W_2波段均表现出显著的日内光变：窗口 3(MJD 56797.42153~56798.8034，见图 2)、窗口 9(MJD 57875.67271~57876.91668，见图 3)和窗口 20(MJD 59698.65573~59700.0264，见图 4)。

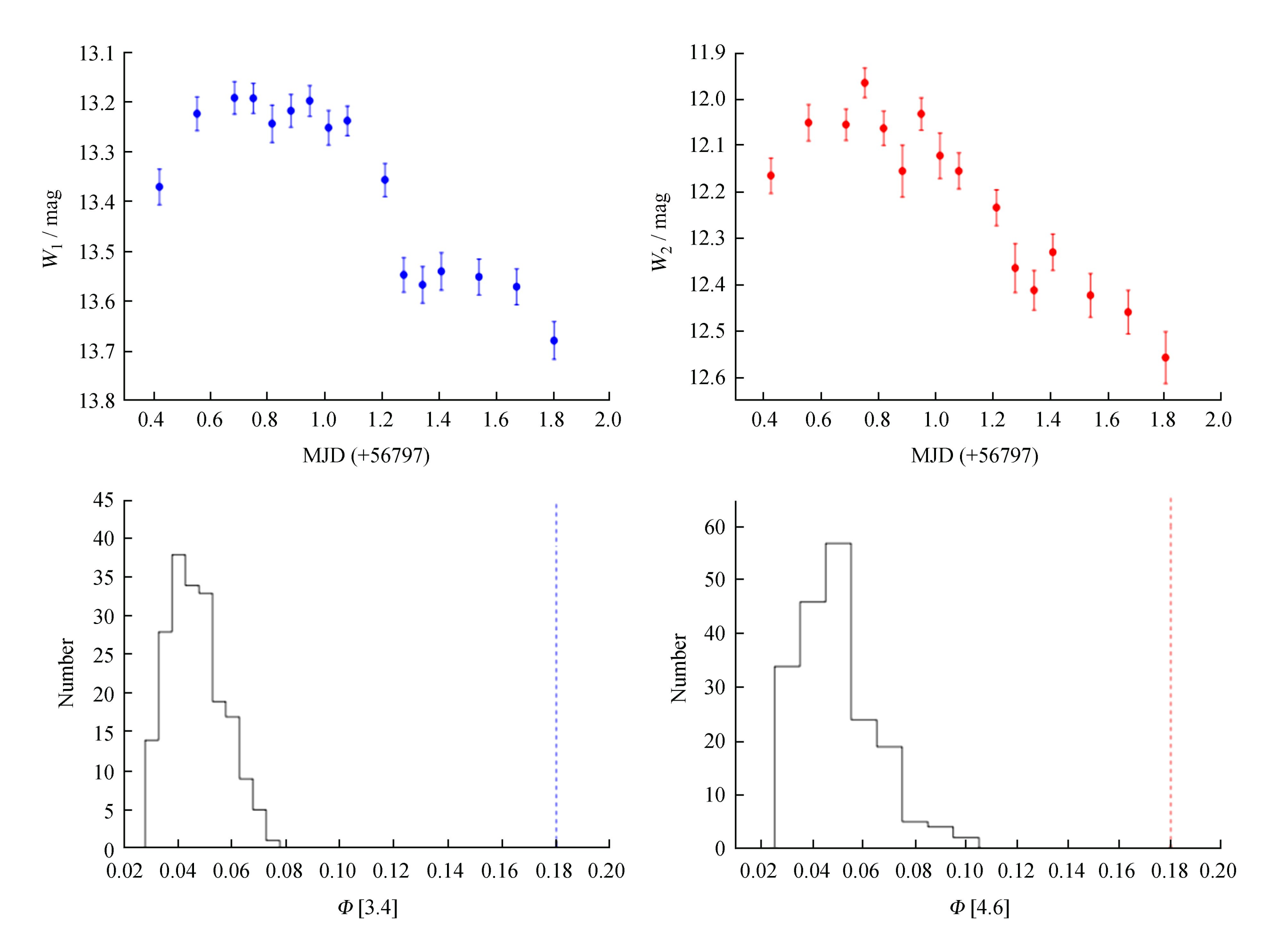


图 2　观测窗口 3(Epoch 3)的 W_1和 W_2波段日内光变(上部两子图)。200 个类似亮度 WISE 源的 W_1和 W_2波段光变标准偏差分布(下部两子图)，其中蓝色和红色竖直虚线表示 TXS 1206+549 的 W_1和 W_2波段光变标准偏差

Fig. 2　IDVs of W_1 and W_2 bands during Epoch 3 (upper two panels). The bottom two panels show the histograms of $\Phi[3.4]$ and $\Phi[4.6]$ of the 200 field sources with the most similar brightness. The vertical dashed lines indicate the $\Phi[3.4]$ (blue) and $\Phi[4.6]$ (red) for TXS 1206+549

特别地，TXS 1206+549 在观测窗口 20，即 2022 年 4 月 29 日，达到所有观测窗口的最亮水平，表现出非常特殊的光变过程：在约 1.24 天内，W_1和 W_2波段分别持续变暗约 1.1 mag 和 1.0 mag。线性拟合光变曲线表明：在 W_1和 W_2波段的变暗率分别为 0.91 mag · day^{-1}和 0.88 mag · day^{-1}。两个波段的光变曲线高度类似，W_1与 W_2星等之间的斯皮尔曼相关系数 $R_s=0.97$。据文献调研，这是首次报道关于 TXS 1206+549 高置信度的中红外波段日内光变。另外，TXS 1206+549 在 3 个观测窗口仅在 W_1波段表现出大于 3σ 的显著光变(见图 5)：窗口 1(MJD 55332.74107~55334.1302)、窗口 2(MJD 55523.31162~55524.56819)和窗口 13(MJD 58445.31964~58446.56296)。文[18]给出计算光变占空系数的方法为

$$DC = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{M} A_i(1/\Delta T_i)}{\sum_{i=1}^{M}(1/\Delta T_i)}\% , \tag{8}$$

ChinaXiv:202311.00004v1

ChinaXiv合作期刊

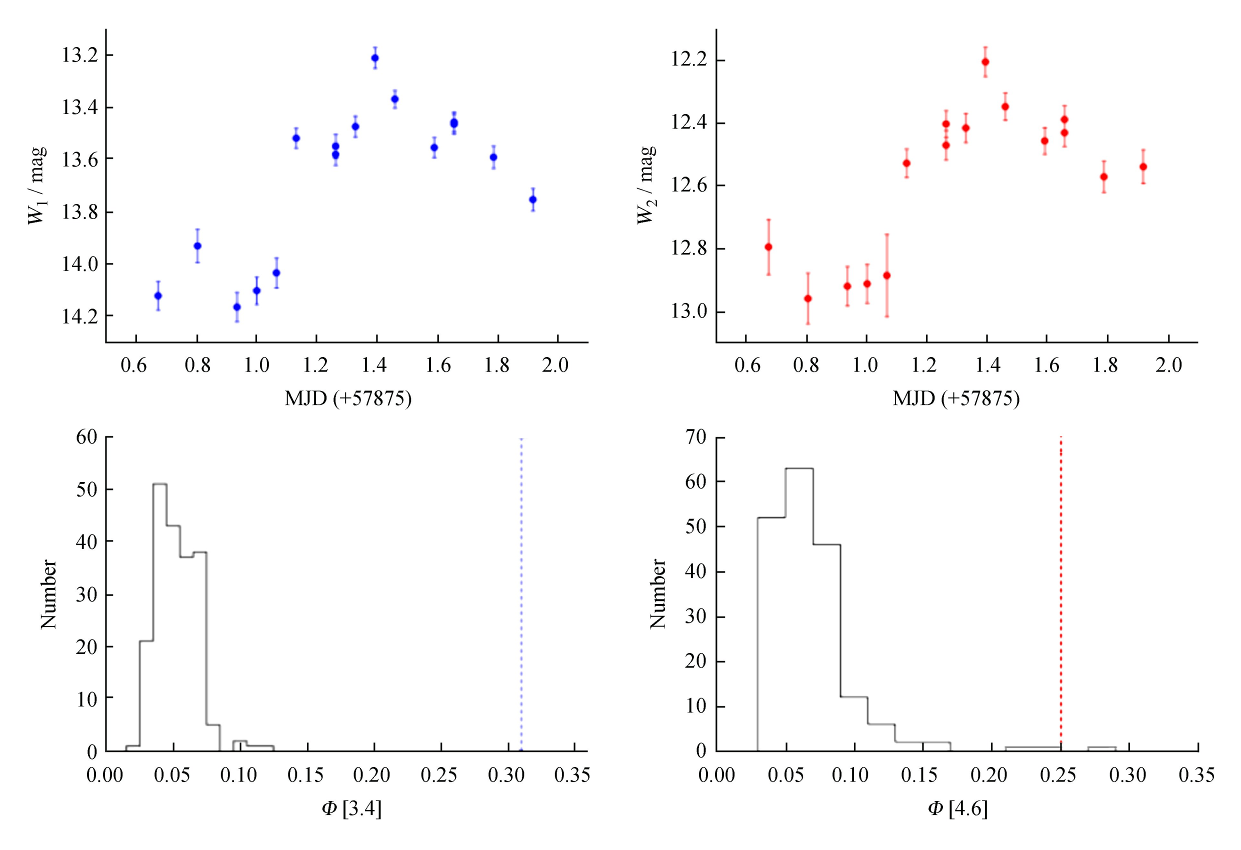


图 3　类似图 2，观测窗口 9(Epoch 9)的光变情况

Fig. 3　Variabilities during Epoch 9, similar to figure 2

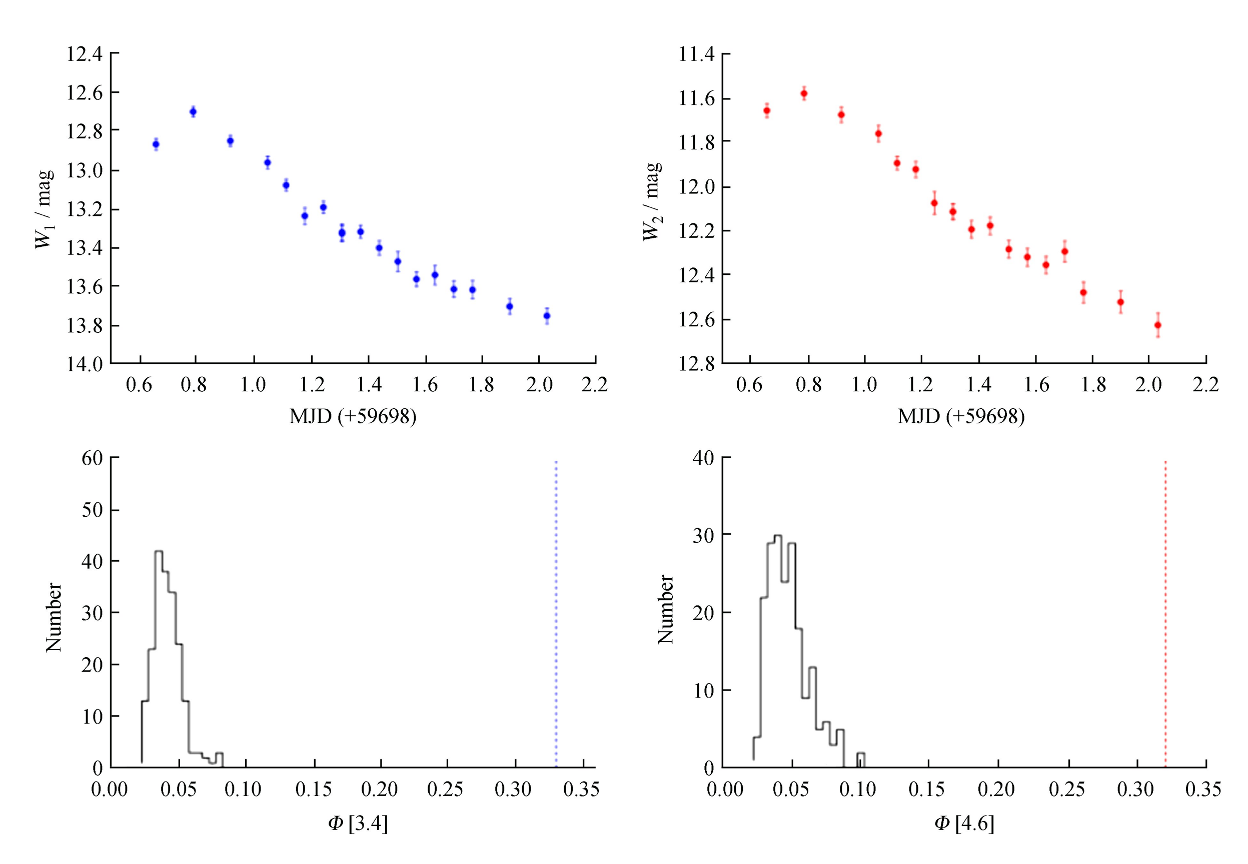


图 4　类似图 2，观测窗口 20(Epoch 20)的光变情况

Fig. 4　Variabilities during Epoch 20, similar to figure 2

ChinaXiv:202311.00004v1

ChinaXiv合作期刊

ChinaXiv:202311.00004v1

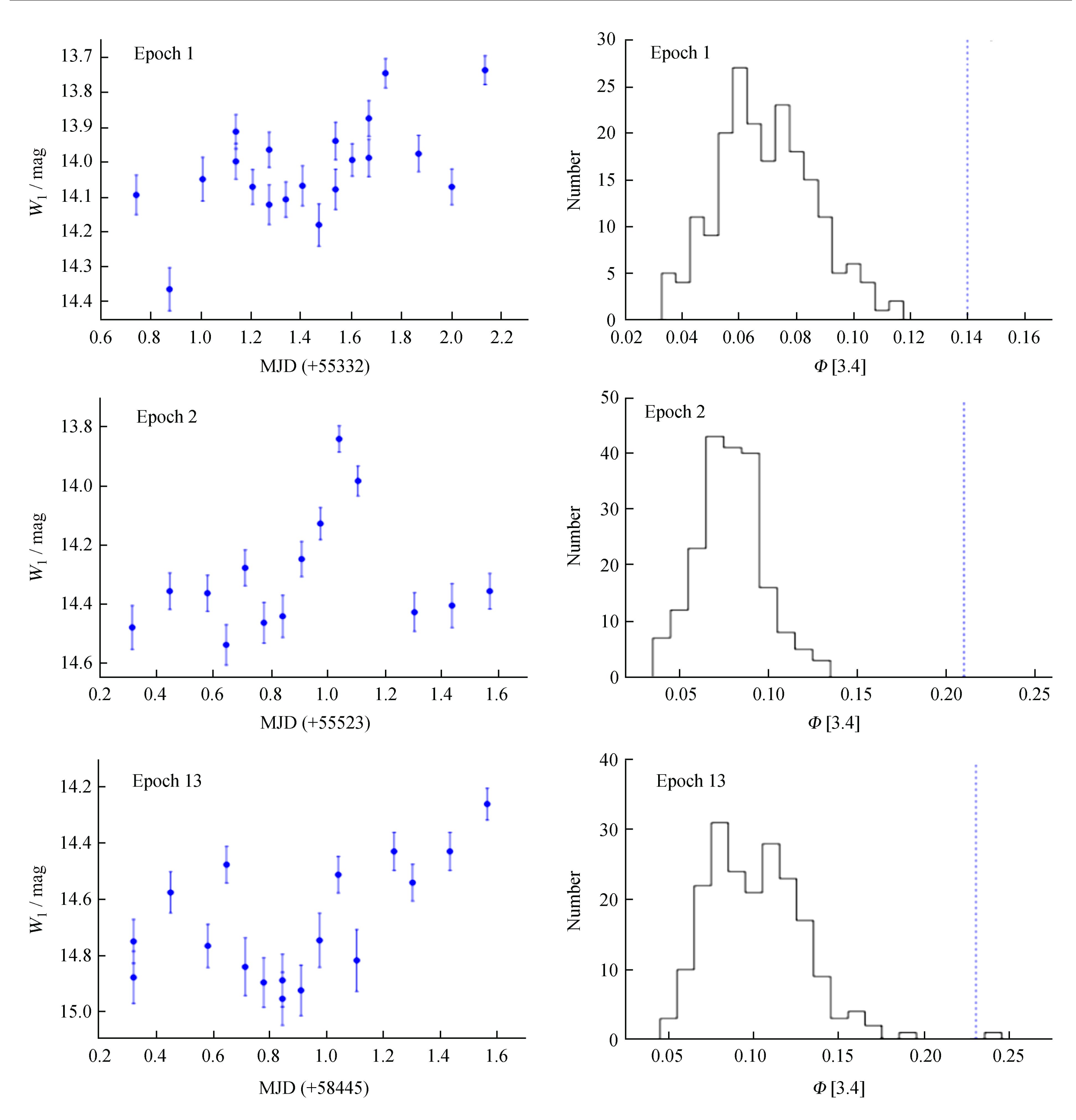


图 5 类似图 2，从上至下反映观测窗口 1，2 和 13(Epoch 1，2 和 13)的 W_1 波段光变情况

Fig. 5 W_1 band variabilities during Epoch 1, 2, 13 (from top to bottom), similar to figure 2

其中，$\Delta T_i = \Delta T_{i,\mathrm{ob}}/(1+z)$；$\Delta T_{i,\mathrm{ob}}$ 为光变曲线时长；z 为红移。当第 i 条天量级光变曲线表现出显著度大于 3σ 的日内光变时，A_i 取 1，否则 A_i 取 0。(8)式给出 TXS 1206+549 在 W_1 和 W_2 波段的占空系数分别为 27.8%和 13.7%，明显小于文[10]报道的占空系数(91%和 79%)。这显然是由于我们采用了更为保守、更为严格的光变标准(大于 3σ)，而文[10]仅要求 $\sigma_{\mathrm{m}} > 0$，这个标准类似 $\Delta > 0$。

另外，联合所有观测窗口，我们研究了流量方均根-流量(rms-flux)关系。首先，将 W_1 星等转换为流量，单位为 μJy。然后，计算每个观测窗口的 W_1 波段平均流量及误差，方法见文[3]的公式(1)和(2)。剩余均方根(excess rms)，记作 σ_{XS}，常用来衡量光变曲线中剔除误差影响后的内禀光变。根据文[19]，

$$\sigma_{\mathrm{XS}} = \sqrt{S^2 - \overline{\sigma_{\mathrm{err}}^2}}\,, \tag{9}$$

其中，S^2 为样本方差；$\overline{\sigma_{\mathrm{err}}^2} = \frac{1}{N_{\mathrm{ob}}}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{ob}}} \sigma_{\mathrm{err},i}^2$；$\sigma_{\mathrm{XS}}$ 误差的计算方法采用文[20]的(8)式。每个观测窗口的

ChinaXiv合作期刊

ChinaXiv:202311.00004v1

时长 ΔT 存在差别，按照文[21]对 σ_{XS} 进行了时长修正。有 3 个观测窗口(Epoch 10，11 和 21)的样本方差 S^2 小于 $\overline{\sigma}_{err}^2$，说明误差主导，没能给出 σ_{XS} 值。图 6 展示了剩余 18 个观测窗口的平均 W_1 波段流量与时长修正 σ_{XS} 之间的关系。两者之间的斯皮尔曼相关系数 $R_s=0.75$，置信水平 $p=1.1\times10^{-4}$。两者之间存在显著的线性相关性。图 6 中的黑色虚线为考虑误差的线性拟合结果，

$$\sigma_{XS}=(0.25\pm0.03)\bar{f}+(-32.53\pm20.30);\qquad(10)$$

黑色点线表示截距固定为 0 时的线性拟合结果，

$$\sigma_{XS}=(0.21\pm0.02)\bar{f}.\qquad(11)$$

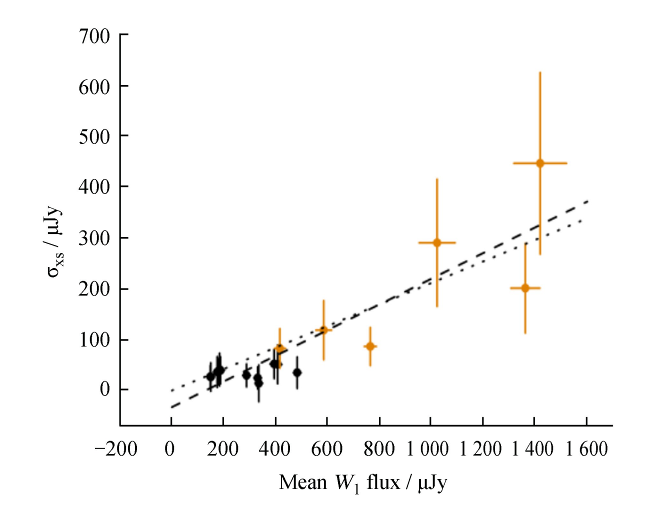


图 6　光变均方根-流量(rms-flux)关系。橘色点对应表现出 3σ 光变的 6 个观测窗口。黑色虚线和点线分别为不固定和固定截距的最佳线性拟合线

Fig. 6　The rms-flux correlation. Orange points indicate six epochs showing 3σ variabilities. The dashed line is the best-fitting straight line for these points, and the dotted line is the best-fitting straight line when forcing intercept of 0

3　颜色变化分析

利用 WISE 研究红外颜色变化的优势体现在 W_1 和 W_2 两个波段的观测是同时性的。为进一步了解 TXS 1206+549 的颜色变化，我们构建了长期和短期颜色-星等图，W_1 星等作为横坐标，颜色 W_1-W_2 作为纵坐标，采用斯皮尔曼相关系数 R_s 描述两者之间的相关性。同时，采用加权最小二乘法，拟合了颜色-星等散点图：$(W_1-W_2)=AW_1+B$，A 为斜率，B 为截距，拟合时考虑颜色和星等的误差。类似文[3]，表征颜色变化趋势为 $A>0$，$R_s>0.5$，$p<0.05$ 时，源表现出变亮变蓝的趋势；$A<0$，$R_s<-0.5$，$p<0.05$ 时，源表现出变亮变红的趋势。

图 7 给出了窗口平均后的长期颜色-星等图。对于 21 个观测窗口，$R_s=0.39$，$p=0.04$。这说明在长时标上，TXS 1206+549 未表现出显著的颜色变化趋势，即表现为准消色差(Quasi-achromatic)。表 5 给出了每个观测窗口的颜色-星等图分析结果。21 个观测窗口中，有 12 个表现出变亮变蓝的趋势，剩余窗口未表现出明显的颜色变化趋势。图 8 给出了 12 个表现出变亮变蓝的趋势的颜色-星等图和线性拟合结果。对于 6 个表现出 3σ 光变的窗口来说，3 个表现出变亮变蓝的趋势。

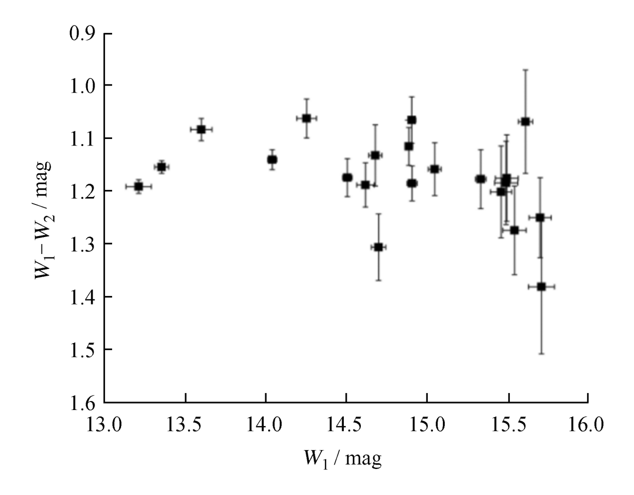


图 7　观测窗口平均后的 $(W_1-W_2)\sim W_1$ 关系

Fig. 7　The correlaiton between the epoch-averaged W_1-W_2 and W_1

4　结果与讨论

利用 WISE 巡天数据，系统研究了目前已知的最遥远的伽马噪窄线赛弗特 1 型星系 TXS 1206+549 的中红外波段光变性质，主要结论如下：

(1)TXS 1206+549 在 2022 年 4 月 29 日达到所有观测窗口的最亮水平，在约 1.24 天内 W_1 和 W_2 波段分别持续变暗约 1.1 mag 和 1.0 mag。这是首次报道 TXS 1206+549 高置信度的中红外波段日内光变。

ChinaXiv合作期刊

ChinaXiv:202311.00004v1

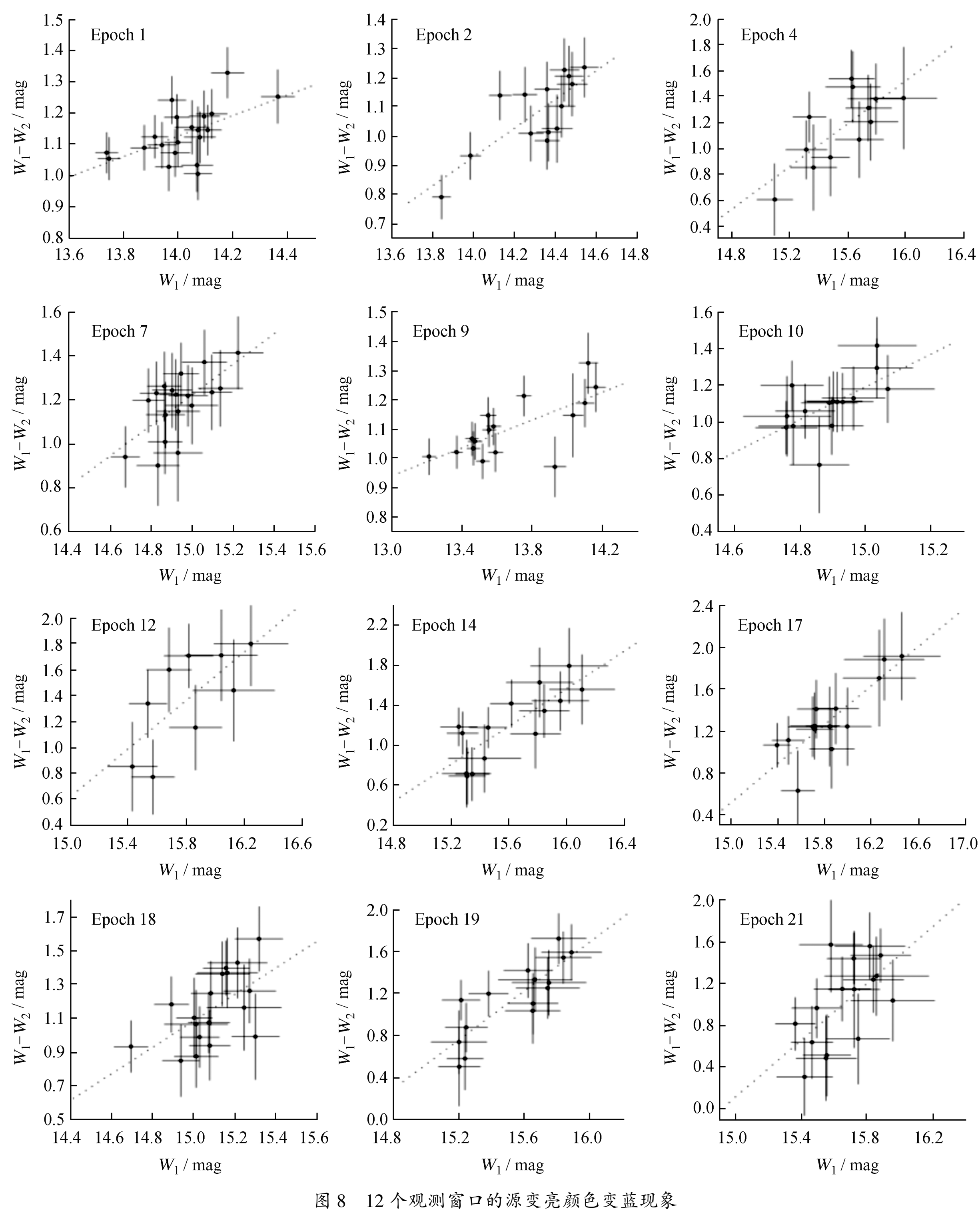


图 8 12 个观测窗口的源变亮颜色变蓝现象

Fig. 8 Bluer-when-brighter during 12 epochs

(2)联合 3 种统计方法研究了 TXS 1206+549 的日内光变，得出 W_1和 W_2波段的光变占空系数分别为 27.8%和 13.7%。

(3)TXS 1206+549 的中红外波段光变存在显著的均方根-流量线性关系。

(4)长期来看，TXS 1206+549 未表现出显著的红外颜色变化，在天量级时标上却普遍表现出变亮变蓝的趋势。

快速光变可用来限定辐射区域的尺寸。假设辐射区域为半径 R 的球状体，利用因果关系可以估

ChinaXiv合作期刊

ChinaXiv:202311.00004v1

计 R 的大小：$R \leqslant c\tau(1+z)^{-1}$，$c$ 为光速；τ 保守取 1 天；$z=1.344$。对于 TXS 1206+549 而言，$R \leqslant 3.4\times10^{-4}$ pc。如果考虑多普勒效应且多普勒因子 δ 取典型值 10，则 $R \leqslant 3.4\times10^{-3}$ pc。活动星系核的红外辐射可能有多种起源[22]，可能是喷流中的同步辐射、尘埃环热辐射、恒星形成过程辐射的混合模式。在 TXS 1206+549 中发现显著的中红外日内光变可以排除(至少在这些观测窗口)辐射由尘埃环辐射主导的可能性，因为一般认为尘埃环距离中心 0.01～0.1 pc。文[13]最早利用 WISE 数据发现两个 GNLS1s 的红外日内光变(PMN J0948+0022，SBS 0846+513)，他们认为红外波段日内光变揭示红外辐射由喷流中相对论性电子的同步辐射主导。

文[10]利用 σ_m 参数研究了 TXS 1206+549 的中红外波段日内光变。采用 $\sigma_m>0$ 的标准，计算了 W_1 和 W_2 波段的占空系数，结果分别为 91% 和 79%。本文联合 3 种统计方法，我们得出 TXS 1206+549 在 W_1 和 W_2 波段的占空系数分别为 27.8% 和 13.7%，显著低于文[10]的相应值。3 种方法中的 $\Delta>0$ 类似于 $\sigma_m>0$。如果仅选择 $\Delta>0$ 作为日内光变标准，W_1 和 W_2 波段的占空系数分别为 79.9% 和 52.3%，接近但仍低于文[10]的占空系数。显然，我们联合 3 种统计方法给出的占空系数值显著低的原因是由于仅挑选置信度大于 3σ 的日内光变，这个标准更为严格，但给出的日内光变可靠度也更高。

表 5　颜色变化分析结果

Table 5　Results of color variability analysis

Epoch (1)	N (2)	Slope (3)	R_s (4)	Prob. (5)	Note (6)
1	20	0.31±0.12	0.56	5.4E−03	BWB
2	14	0.51±0.12	0.76	7.2E−04	BWB
3	16	−0.01±0.08	−0.15	2.9E−01	—
4	12	0.80±0.34	0.60	2.1E−02	BWB
5	16	0.72±0.21	0.40	6.9E−02	—
6	11	0.01±0.30	−0.19	3.0E−01	—
7	18	0.70±0.28	0.56	8.9E−03	BWB
8	13	0.34±0.32	0.25	2.2E−01	—
9	16	0.25±0.07	0.63	4.5E−03	BWB
10	15	0.83±0.43	0.69	2.2E−03	BWB
11	11	0.41±0.61	0.52	5.7E−02	—
12	9	0.96±0.41	0.70	2.0E−02	BWB
13	17	0.39±0.14	0.46	3.5E−02	—
14	14	0.78±0.26	0.72	1.6E−03	BWB
15	11	0.20±0.34	0.48	7.4E−02	—
16	15	0.23±0.45	0.17	2.9E−01	—
17	14	0.80±0.30	0.78	3.8E−04	BWB
18	18	0.80±0.28	0.63	2.7E−03	BWB
19	15	1.03±0.27	0.84	1.7E−05	BWB
20	18	0.05±0.04	0.16	2.7E−01	—
21	16	1.38±0.45	0.60	7.9E−03	BWB

从图 1 可看出长时标上 TXS 1206+549 的 W_1 和 W_2 波段亮度变化幅度大：在所有观测窗口里(2010 年 5 月至 2022 年 12 月)，W_1 波段星等变化了约 3.76 mag，W_2 波段星等变化了约 3.53 mag。另一方面，红外颜色(W_1-W_2)却未发生显著的变化(见图 1 和图 7)。联合这两个观测事实，我们认为 TXS 1206+549 的长期红外光变可用观测视角变化导致多普勒因子变化的简单机制来解释[23]。文[9]系统研究了 GNLS1s 在天量级时标上的红外颜色变化，发现变亮变蓝的趋势普遍存在。本文发现 TXS 1206+549 同样在大部分观测窗口表现出变亮变蓝的趋势。GNLS1s 的日内光变能用喷流中的激波传播来解释，同时激波能引起依赖频率的短时标光变，从而导致变亮变蓝的趋势[9,24-25]。联合所有观测窗口，我们发现 TXS 1206+549 的中红外波段光变存在显著的均方根−流量线性相关。这表明在各种流量水平状态下(低态与高态)的光变是有关联性的[26-27]，当源处于高态时光变更剧烈。

致谢：本文利用了广域红外巡天探测器提供的巡天数据。该项目由加州理工学院喷气推进实验室和亚利桑那大学联合执行，美国航空航天局(NASA)提供资金支持。

参考文献：

[1]　URRY C M, PADOVANI P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107(715): 803-845.

ChinaXiv合作期刊

[2] OSTERBROCK D E, POGGE R W. The spectra of narrow-line Seyfert 1 galaxies [J]. The Astrophysical Journal, 1985, 297(1): 166-176.

[3] 毛李胜. 伽马噪窄线赛弗特 1 型星系的长期红外光变和颜色变化 [J]. 天文研究与技术, 2021, 18(2): 162-172.

MAO L S. The long-term infrared brightness and color variabilities of γ-ray-loud narrow-line Seyfert 1 galaxies [J]. Astronomical Research & Technology, 2021, 18(2): 162-172.

[4] YUAN W, ZHOU H Y, KOMOSSA S, et al. A population of radio-loud narrow-line Seyfert 1 galaxies with blazar-like properties? [J]. The Astrophysical Journal, 2008, 685(2): 801-827.

[5] COLLIN S, KAWAGUCHI T. Super-eddington accretion rates in narrow line Seyfert 1 galaxies [J]. Astronomy and Astrophysics, 2004, 426: 797-808.

[6] PALIYA V S. Gamma-ray emitting narrow-line Seyfert 1 galaxies: past, present, and future [J]. Journal of Astrophysics and Astronomy, 2019, 40(5): 39.

[7] AJELLO M, ANGIONI R, AXELSSON M, et al. The fourth catalog of active galactic nuclei detected by the Fermi large area telescope [J]. The Astrophysical Journal, 2020, 892(2): 105.

[8] D'AMMANDO F. Relativistic jets in gamma-ray-emitting narrow-line Seyfert 1 galaxies [J]. Galaxies, 2019, 7(4): 87.

[9] MAO L S, YI T F. A search for rapid mid-infrared variability in gamma-ray-emitting narrow-line Seyfert 1 galaxies [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2021, 255(1): 10.

[10] RAKSHIT S, SCHRAMM M, STALIN C S, et al. TXS 1206+549: a new γ-ray-detected narrow-line Seyfert 1 galaxy at redshift 1.34? [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 501(1): 22-27.

[11] SESAR B, IVEZIC Z, LUPTON R H, et al. Exploring the variable sky with the sloan digital sky survey [J]. The Astronomical Journal, 2007, 134(6): 2236-2251.

[12] WRIGHT E L, EISENHARDT P R M, MAINZER A K, et al. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): mission description and initial on-orbit performance [J]. The Astronomical Journal, 2010, 140(6): 1868-1881.

[13] JIANG N, ZHOU H, HO L C, et al. Rapid infrared variability of three radio-loud narrow-line Seyfert 1 galaxies: a view from the wide-field infrared survey explorer [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2012, 759(2): 31.

[14] ASSEF R J, STERN D, NOIROT G, et al. The WISE AGN catalog [J]. The Astrophysical Journal Supplement, 2018, 234: 23.

[15] MCLAUGHLIN M A, MATTOX J R, CORDES J M, et al. Variability of CGRO/EGRET gamma-ray sources [J]. The Astrophysical Journal, 1996, 473: 763-772.

[16] SANCHEZ P, LIRA P, CARTIER R, et al. Near-infrared variability of obscured and unobscured X-ray-selected AGNs in the COSMOS field [J]. The Astrophysical Journal, 2017, 849(2): 110.

[17] KOZLOWSKI S, KOCHANEK C S, STERN D, et al. Mid-infrared variability from the spitzer deep wide-field survey [J]. The Astrophysical Journal, 2010, 716(1): 530-543.

[18] ROMETO G E, CELLONE S A, COMBI J A. Optical microvariability of southern AGNs [J]. Astronomy and Astrophysics Supplement, 1999, 135: 477-486.

[19] VAUGHAN S, EDELSON R, WARWICK R S, et al. On characterizing the variability properties of X-ray light curves from active galaxies [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2003, 345(4): 1271-1284.

[20] BHATTACHARYYA S, GHOSH R, CHATTERJEE R, et al. Blazar variability: a study of non-stationarity and the flux-rms relation [J]. The Astrophysical Journal, 2020, 897(1): 25.

ChinaXiv:202311.00004v1

ChinaXiv合作期刊

[21] BACHEV R, TRIPATHI T, GUPTA A C, et al. Intra-night optical flux and polarization variability of BL Lacertae during its 2020−2021 high state [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2023, 522(2): 3018−3035.
[22] CACCIANIGA A, ANTON S, BALLO L, et al. WISE colours and star formation in the host galaxies of radio-loud narrow-line Seyfert 1 [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 451(2): 1795−1805.
[23] RAITERI C M, VILLATA M, ACOSTA-PULIDO J A, et al. Blazar spectral variability as explained by a twisted inhomogeneous jet [J]. Nature, 2017, 552(7685): 374−377.
[24] MARSCHER A P, GEAR W K. Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273 [J]. The Astrophysical Journal, 1985, 298: 114−127.
[25] RANI B, GUPTA A C, STRIGACHEV A, et al. Short-term flux and colour variations in low-energy peaked blazars [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 404(4): 1992−2017.
[26] BHATTA G. Characterizing long-term optical variability properties of γ-ray-bright blazars [J]. The Astrophysical Journal, 2021, 923(1): 7.
[27] UTTLEY P, MCHARDY I M, VAUGHAN S, et al. Non-linear X-ray variability in X-ray binaries and active galaxies [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, 359(1): 345−362.

Mid-infrared Variability Properties of Gamma-ray-loud Narrow Line Seyfert 1 Galaxy TXS 1206+549

Huang Weitian, Ning Gongming, Mao Lisheng*

(School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China, Email: maolisheng@ynnu.edu.cn)

Abstract: TXS 1206+549 (redshift $z=1.344$) is the most distant gamma-ray-loud narrow line Seyfert 1 galaxy discovered so far. Using long-term photometric data from the Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE), we systematically investigate the mid-infrared variability properties of TXS 1206+549 from two aspects. First, the mid-infrared Intraday Variability (IDV) of TXS 1206+549 was investigated by combining three statistical methods. It is found that TXS 1206+549 reached the brightest level of all WISE observational epochs on April 29, 2022, exhibiting a very specific IDV: In the 3.4 μm and 4.6 μm bands, TXS 1206+549 continuously darkened by about 1.1 and 1.0 magnitudes, respectively, within about 1.24 days. The duty cycle (DC) of TXS 1206+549 in the 3.4 μm and 4.6 μm bands are 27.8% and 13.7%, respectively, which are significantly lower than the results reported by Rakshit et al. (2021). This ascribes to our more conservative IDV criterion ($>3\sigma$). The root-mean-square-flux (rms-flux) relationship was investigated based on the photometric data from all WISE observational epochs (21 in total), and a significant linear correlation was found. TXS 1206+549 did not exhibit significant color changes (i.e., achromatic) during the long-term timescale, but generally exhibited a trend of bluer-when-brighter (BWB) during day-long timescales. These results imply different mechanisms for the mid-infrared variability of TXS 1206+549 at different timescales: the long-term variability may be related to Doppler effect, while the IDVs may be related to shocks in the jet.

Key words: Seyfert galaxy; infrared variability; color variability; shock

ChinaXiv:202311.00004v1